不飽和砂質土の繰返し三軸試験と弾粘塑性構成式によるシミュレーション

(現中日本高速道路)方

〇中島 康介	正会員	京都大学大学院
岡 二三生	フェロー会員	京都大学大学院
木元 小百合	正会員	京都大学大学院
肥後 陽介	正会員	京都大学大学院
松本 真明	正会員	京都大学大学院

1. はじめに

本研究では、地震時における不飽和地盤の力学特性 の把握を目的とし、排気・排水条件下での不飽和繰返し 三軸試験を行い、諸条件が挙動に及ぼす影響について 検討を行った。また、不飽和モデルの構築を目的とし て不飽和土の繰返し弾粘塑性構成式を用いて排気・排水 試験結果の再現を試みた。

2. 試験概要

本研究では、淀川の堤防の改修に用いられている砂 質土を 2 mm以下にふるい分けしたものを試料として三 軸試験を行った。試料を最適含水比 13.7%に調整し、 高さ 100 mm, 直径 50 mm, 締固め度が 85%となるよう に静的締固め機を用いて締固め、供試体を作製した。 供試体諸量を表 1 に示す。せん断開始後の体積変化を

測定するため,側方変位を 計測するギャップセンサー をセル内に設置¹⁾した。ま た,供試体上部で間隙空気 圧を計測するためポリフロ ンフィルターを,供試体下 部で間隙水圧を計測するため

表1 供試体諸量	₹1	供試体諸量	
----------	----	-------	--

高さ(cm)	10
直径(cm)	5
体積(cm ³)	196.3
重量(g)	353.1
飽和度(%)	53.4
乾燥密度(g/cm ³)	1.582
締固め度(%)	85
間隙比	0.682

セラミックディスク(A.E.V. 200kPa)付きのペデス タルを用いた。より正確に間隙空気圧を測定するため, 間隙空気圧計を供試体上部のキャップに取り付け,供 試体から間隙空気圧計までの距離を短くしてある。

試験条件は、セルE 300kPa,空気E 200kPa,初期 サクション 50kPa,応力振幅 50kPa,ひずみ速度 0.01,0.1,0.75%/min,繰返し回数 50 回とした。

3. 応力変数

混合体理論に基づき,応力変数として次式で表され る平均骨格応力 σ''_m ²⁾³⁾を用いて,試験結果を整理した。 $\sigma''_m = \sigma_m - P^F = \sigma_m - [(1 - S_r)u_a + S_r u_w]$ (1) ここで, P^F は平均間隙圧, u_a は間隙空気圧, u_w は間 隙水圧, S_r は飽和度, σ_m は平均全応力である。

4. 試験結果

図 1(a), 図 2(a)に排気 - 排水条件下の応力振幅 50kPa, 初期サクション 50kPa,ひずみ速度 0.01,0.75%/min の ケースの試験結果を示す。ひずみ速度 0.01 %/min のケ ースでは繰返し回数初期の時点での圧縮体積ひずみの 卓越が見られ大きく体積ひずみが発生している。

5. 不飽和繰返し粘弾粘塑性構成式

本研究では、矢吹⁴⁾により提案されている不飽和繰返し弾粘塑性構成モデルにフォークト要素からなる粘 弾性モデルを導入した粘弾粘塑性構成モデルを用いて 排気・排水条件、応力振幅 50kPa、締固め度 85%におけ る試験結果の再現を試みた。

5.1 繰返し粘弾粘塑性構成式の定式化

ここでは粘弾粘塑性モデルの中で弾粘塑性モデルと 異なる部分についてのみ示す。過圧密境界面,静的降伏 関数,粘塑性ポテンシャル関数,非線形移動硬化則,流 れ則,サクションの効果等は矢吹4⁰と同様の式を用いて いる為そちらを参照されたい。

全ひずみ速度

弾粘塑性モデルにおいては全ひずみ速度は弾性ひずみ 速度 $\dot{\epsilon}^{e}_{ij}$ と粘塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}^{vp}_{ij}$ との和で表される。

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{ij} &= \dot{\varepsilon}_{ij}^{e} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} \\ &= \frac{1}{2G} \dot{S}_{ij} + \frac{1}{K} \dot{\sigma}'_{m} \frac{\delta_{ij}}{3} \\ &+ C_{01} \sigma'_{m} \exp\left\{m' \left(\bar{\eta}_{\chi}^{*} + \tilde{M}^{*} \ln \frac{\sigma'_{m}}{\sigma'_{mb}}\right)\right\} \frac{\partial f_{p}}{\partial S_{ij}} \\ &+ C_{02} \sigma'_{m} \exp\left\{m' \left(\bar{\eta}_{\chi}^{*} + \tilde{M}^{*} \ln \frac{\sigma'_{m}}{\sigma'_{mb}}\right)\right\} \frac{\partial f_{p}}{\partial \sigma'_{m}} \frac{\delta_{ij}}{3} \end{aligned}$$
(3)

そして今回用いた粘弾粘塑性モデルにおいて全ひずみ 速度は粘弾性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}^{ve}$ と粘塑性ひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ との和で表される。

 $\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{ve} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{e} + \dot{e}_{ij}^{vev} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}$ (4) ここで、 \dot{e}_{ij}^{vev} はフォークト要素での偏差ひずみ速度テ ンソルであり、次式で表わされる。

$$\dot{e}_{ij}^{vev} = \frac{1}{\mu} \left(S_{ij} - 2G_2 e_{ij}^{vev} \right)$$
(5)

 μ , G_2 はフォークト要素でのせん断弾性係数と粘性

キーワード 不飽和土,繰返し載荷,サクション,構成式

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学 4C クラスターC1 棟 TEL 075-383-3193

係数である。そのため粘弾粘塑性モデルを導入すると 式(3)は式(6)のように表される。

$$\begin{aligned} \dot{\varepsilon}_{ij} &= \frac{1}{2G} \dot{S}_{ij} + \frac{1}{\mu} \left(S_{ij} - 2G_2 e_{ij}^{vev} \right) + \frac{1}{K} \dot{\sigma}'_m \frac{\delta_{ij}}{3} \\ &+ C_{01} \sigma'_m \exp\left\{ m' \left(\bar{\eta}^*_{\chi} + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}} \right) \right\} \frac{\partial f_p}{\partial S_{ij}} \\ &+ C_{02} \sigma'_m \exp\left\{ m' \left(\bar{\eta}^*_{\chi} + \tilde{M}^* \ln \frac{\sigma'_m}{\sigma'_{mb}} \right) \right\} \frac{\partial f_p}{\partial \sigma'_m} \frac{\delta_{ij}}{3} \end{aligned}$$
(6)
5.2 $\checkmark \Xi \supset \not{} = \checkmark \exists \checkmark i \Xi$

シミュレーションに用いたパラメータを表2に結果 を図1,2に示す。図1(a),図1(b)の繰返し回数50回目 の応力ひずみグラフを見るとループは開いている状態 である。しかし図 1(c)を見ると応力ひずみループは閉じ ている。過圧密領域内での挙動は弾粘塑性モデルでは 弾性ひずみ速度が支配的となり応力ひずみループは直 線に近い形になったのに対し、粘弾粘塑性モデルでは 粘性による応力緩和が働くため応力ひずみループは開 いた形となる。今回の解析により、粘弾粘塑性モデル を用いてフォークト要素の粘性係数を変化させる事で 応力ひずみループの面積を制御出来る事が明らかとな った。また、図 2(b)を見ると粘塑性パラメータ m'=40 での解析結果において、ひずみ速度による体積ひずみ の発生量の差が図2(a)の実験結果よりも大きくなった。 そこで m'を 80 にした計算を行うことにより,図 2(c) の様にひずみ速度による影響の大きさを小さくする事 が出来た。上記の結果からシミュレーションによる試 験結果の再現性が高められたと言える。

Degree of compaction (%)	85	
Deviator stress amplitude (kPa)	50	
Strain rate (%/min)	0.01	0.75
Initial suction, s (kPa)	50	
Compression index, λ	0.0608	
Swelling index, K	0.004	
Initial void ratio, e_0	0.656	0.641
Initial elastic shear modulus, G ₀ (kPa)	20000	
Initial mean skeleton stress, $\sigma'_{\sf me}$ (kPa)	127	
Stress ratio at critical state, M_{fc}^{*}	1.18	
Stress ratio at maximum compression, M^*_{mc}	1.18	
Stress ratio at critical state, M_{fe}^{*}	0.799	
Stress ratio at maximum extension, M_{me}^{*}	0.799	
Material Parameter, <i>B</i> *	80	
Material Parameter, B [*] 1	15	
Material Parameter, Cf	2	
Structural parameter, SI	0.2	
Structural parameter, sd	0.6	
Initial value for $\sigma'_{mai}, \sigma'_{mai}$ (kPa)	150	
Initial yield stress, $\sigma'_{\sf mbi}$ (kPa)	180	
Viscoplastic parameter, m'	40,80	
Viscoplastic parameter, C_{01} (1/s)	0.5 X 10 ^{−5}	
Viscoplastic parameter, C_{02} (1/s)	0.5 X 10 ^{−5}	
Structural parameter, $\sigma'_{\sf maf}$ (kPa)	80	
Structural parameter, β	5.0	
Second shear modulus, G ₂ (kPa)	5000	
Viscos coefficient, μ (kPa s)	5.0×10^{7}	

表 2. 解析に用いたパラメータ

6. まとめ

不飽和砂質土を用いた繰返し三軸試験を行い,粘弾 粘塑性構成式を用いた試験結果の再現を試みた。その 結果粘弾性要素がグラフの形状に与える影響と,粘塑 性パラメータ m'がひずみ発生量に与える影響を確認し 試験結果の再現性を高める事が出来た。



参考文献

1)Kim, Y. S. : *Elasto-viscoplastic Modeling and Analysis for Cohesive Soil Considering Suction and Temperature Effects*, Doctoral thesis, Kyoto University, 2004.

2)Jommi, C. : *Experimental Evidence and Theoretical Approaches in Unsaturated Soils*, Tarantino, A. and Mancuso, C. eds., Balkema, 139-153, 2000.

3)Oka,F. et al.:Proc. 1st European Conference on Unsaturated Soils, Durham, Taylor & Francis Group, pp.735-741, 2008.

4)矢吹太一:不飽和砂質土の排気 - 排水三軸試験とそのモデル化,土木学会第64回年次学術講演会, pp.653-654, 2009.